El Origen de la Energía Oscura

Un Modelo Cosmológico con Acoplamiento Materia-Energía Oscura

Dr. Carlos David Bianco Moreno

C.I.: 17.570.016

carlosdavid1985@hotmail.es

Venezuela 08/12/2025

Resumen

La naturaleza de la energía oscura, responsable de la expansión acelerada del universo, sigue siendo uno de los problemas más profundos de la física moderna. El modelo estándar ΛCDM, que postula una constante cosmológica (Λ), enfrenta seros desafíos teóricos, incluyendo el problema de la coincidencia y la discrepancia en la predicción de su valor. En este trabajo, presentamos una alternativa mecanicista: la Teoría de la Conversión Cosmológica Extendida (TCCE). Proponemos que la energía oscura es un fluido cuántico fundamental, la Energía Oscura Primordial (EOP), que se genera continuamente a partir de la conversión de masa-energía durante procesos astrofísicos de alta energía, con una contribución dominante de la acreción en agujeros negros supermasivos. La teoría se formula dentro de un marco de acoplamiento interactivo donde el tensor de energía-momento total se conserva estrictamente, pero los componentes de materia y energía oscura intercambian energía. Derivamos las ecuaciones de Friedmann modificadas y las ecuaciones de continuidad acopladas, definiendo un término de interacción Γ(t) cuantificable a partir de la historia de la formación estelar y la actividad de los cuásares. La TCCE predice una ecuación de estado de **w = -1** y, crucialmente, una correlación observable y única entre la historia de la expansión cósmica y la evolución de la tasa de acreción de agujeros negros. Este modelo ofrece una solución natural al problema de la coincidencia y presenta predicciones falsables con las próximas generaciones de sondeos cosmológicos.

Introducción

El modelo cosmológico estándar, ΛCDM, ha tenido un éxito extraordinario en describir una amplia gama de observaciones cosmológicas, desde la radiación de fondo de microondas cósmico (CMB) hasta la distribución de a gran escala de las galaxias. Sin embargo, su éxito se basa en la existencia de dos componentes misteriosos: la materia oscura y la energía oscura. Esta última, que constituye aproximadamente el 68% de la densidad de energía del universo, es la responsable de la expansión acelerada descubierta a través de observaciones de supernovas Tipo Ia [1, 2].

La descripción más simple de la energía oscura es la constante cosmológica (Λ), una energía intrínseca del vacío con una ecuación de estado **$w = p/\rho c^2 = -1$**. A pesar de su elegancia, esta interpretación adolece de problemas teóricos profundos. El "problema de la constante cosmológica" es la enorme discrepancia entre el valor observado de Λ y el valor predicho por la teoría cuántica de campos [3]. El "problema de la coincidencia" cuestiona por qué la densidad de energía oscura es del mismo orden de magnitud que la densidad de materia hoy en día, a pesar de sus evoluciones drásticamente diferentes con el tiempo [4].

Estos problemas han motivado la búsqueda de modelos alternativos, conocidos como energía oscura dinámica, donde la densidad de energía oscura evoluciona con el tiempo [5]. Modelos como la cuintesencia introducen campos escalares que se ruedan lentamente por un potencial de energía [6]. Si bien estos modelos pueden aliviar algunos problemas, a menudo carecen de un mecanismo fundamental que explique el origen del campo o su energía.

En este artículo, proponemos un nuevo paradigma, la **Teoría de la Conversión Cosmológica Extendida (TCCE)**. En lugar de ser una propiedad del vacío, postulamos que la energía oscura es un subproducto de la evolución astrofísica del universo. La teoría se basa en un mecanismo de acoplamiento energético que garantiza la conservación del tensor de energía-momento total, proporcionando una base física y matemática sólida para la conversión de materia en energía oscura.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2, detallamos el marco teórico de la TCCE, sus postulados fundamentales y el mecanismo de transferencia de energía. En la Sección 3, comparamos la TCCE con el modelo ΛCDM y otros modelos dinámicos. En la Sección 4, discutimos las consecuencias observacionales y las predicciones falsables de la teoría. Finalmente, en la Sección 5, presentamos nuestras conclusiones.

Marco Teórico de la TCCE

Postulados Fundamentales

La TCCE se construye sobre el siguiente principio y postulados:

- **Principio de Conversión con Residuo:** Durante los procesos astrofísicos de alta energía y alta curvatura espaciotemporal, una fracción de la masa-energía del sistema se convierte en una forma de energía fundamental que denominamos **Energía Oscura Primordial (EOP)**.
- **Postulado I (Naturaleza de la EOP):** La EOP es la excitación de un campo cuántico fundamental que permea el espacio-tiempo. A escalas cosmológicas, se comporta como un fluido perfecto, homogéneo y no interactuante gravitacionalmente, salvo por su efecto en la métrica del espacio-tiempo.
- **Postulado II (Ecuación de Estado):** La EOP tiene una ecuación de estado de $\mathbf{w = -1}$, lo que implica una presión negativa $\mathbf{p_{DE} = -\rho_{DE} c^2}$ que actúa como la fuerza impulsora de la expansión acelerada.
- **Postulado III (Mecanismo de Generación):** La tasa de generación de EOP es proporcional a la potencia de los procesos astrofísicos más energéticos, principalmente:
  1. La fusión nuclear en estrellas.
  2. La acreción de materia en agujeros negros supermasivos (SMBHs), siendo esta la fuente dominante debido a la alta eficiencia de conversión de masa en energía en los discos de acreción y la extrema curvatura cerca del horizonte de sucesos.

Mecanismo de Transferencia de Energía-Momento

La base de la TCCE es que la energía no se crea, sino que se transforma. Para formalizar esto, consideramos el universo como un sistema compuesto por, como mínimo, tres fluidos: radiación (**r**), materia (**m**) y EOP (**DE**). En la Relatividad General, la conservación de la energía y el momento se expresa a través de la divergencia covariante del tensor de energía-momento total:

$$\nabla_\mu T^{\mu\nu}_{total} = \nabla_\mu (T^{\mu\nu}_m + T^{\mu\nu}_r + T^{\mu\nu}_{DE}) = 0$$

En la TCCE, postulamos que los componentes individuales no se conservan por separado, sino que intercambian energía. Específicamente, proponemos un flujo de energía desde el sector de la materia hacia el sector de la EOP. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\nabla_\mu T^{\mu\nu}_m = -Q^\nu \quad \nabla_\mu T^{\mu\nu}_{DE} = +Q^\nu$$

donde $\mathbf{Q^\nu}$ es el vector de flujo de cuatro-momento que describe la transferencia de energía. Para un fondo cosmológico homogéneo e isotrópico (métrica FLRW), este vector se reduce a un término escalar de interacción, que denotamos como $\mathbf{\Gamma(t)\rho_m}$, donde $\mathbf{\Gamma(t)}$ tiene unidades de inversa de tiempo.

Dinámica Cosmológica Modificada

Las ecuaciones de Friedmann para un universo plano (**k=0**) con este nuevo componente dinámico son:

$(\dot{a}/a)^2 = H^2 = (8\pi G/3)(\rho_m + \rho_r + \rho_{DE})$ (1) $\ddot{a}/a = -(4\pi G/3)(\rho_m + \rho_r + \rho_{DE} + 3(p_m + p_r + p_{DE})/c^2)$ (2)

Las ecuaciones de continuidad modificadas para la materia y la EOP, derivadas de $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = \pm Q^\nu$, son:

$d\rho_m/dt + 3H\rho_m = -\Gamma(t)\rho_m$ (3) $d\rho_{DE}/dt + 3H(\rho_{DE} + p_{DE}/c^2) = +\Gamma(t)\rho_m$ (4)

La ecuación para la radiación permanece estándar: $d\rho_r/dt + 4H\rho_r = 0$.

La ecuación (3) muestra que la densidad de materia se diluye no solo por la expansión (a^{-3}) sino también por su conversión en EOP. La ecuación (4) muestra que la densidad de EOP aumenta debido a esta conversión. Sumando (3) y (4) se demuestra la conservación del sistema combinado materia-EOP:

$$d(\rho_m + \rho_{DE})/dt + 3H[\rho_m + (\rho_{DE} + p_{DE}/c^2)] = 0$$

lo que confirma que el formalismo es matemáticamente consistente con el principio de conservación de la energía-momento total.

Parametrización del Término de Interacción

El término de interacción $\Gamma(t)$ es el corazón de la teoría y debe estar ligado a la física observable. La tasa de ganancia de EOP, $d\rho_{DE}/dt$, debe ser igual a la tasa de generación por fuentes astrofísicas, $S(t)$.

$\Gamma(t)\rho_m = S(t) = \varepsilon_{star}\,\Psi(t) + \varepsilon_{BH}\,\Phi(t)$ (5)

donde:

- $\Psi(t)$ es la tasa de formación estelar cósmica (masa solar por año por Mpc^3).
- $\Phi(t)$ es la densidad de la tasa de acreción de SMBHs (masa solar por año por Mpc^3).
- ε_{star} y ε_{BH} son constantes de acoplamiento adimensionales que cuantifican la eficiencia de la conversión.

Por lo tanto, la tasa de conversión cosmológica es:

$\Gamma(t) = [\varepsilon_{star}\,\Psi(t) + \varepsilon_{BH}\,\Phi(t)] / \rho_m(t)$ (6)

Esta formulación vincula directamente la evolución de la energía oscura con la historia astrofísica del universo.

Comparación con Modelos Establecidos

- **vs. ΛCDM:** La diferencia fundamental es que en ΛCDM, **ρ_Λ** es una constante (**$d\rho_\Lambda/dt = 0$**). En la TCCE, **$\rho_{DE}(t)$** es dinámica. La TCCE resuelve el problema de la coincidencia de forma natural: la energía oscura domina ahora porque la acumulación de EOP a lo largo de la historia cósmica ha alcanzado un nivel crítico.
- **vs. Quintessencia:** La Quintessencia postula un campo escalar con **$w \geq -1$**. La TCCE predice **$w = -1$** exactamente. La diferencia más importante es que la TCCE proporciona un mecanismo de fuente específico y cuantificable, mientras que los modelos de quintessencia a menudo no lo hacen.

Consecuencias Observacionales y Predicciones

La TCCE realiza predicciones claras y falsables:

1. **Ecuación de Estado:** La teoría predice **$w = -1$** con alta precisión. Futuras mediciones que encuentren **$w \neq -1$** refutarían la TCCE.
2. **Correlación Expansión-Cuásares:** La predicción más distintiva es que la historia de la expansión, **$H(z)$**, debe estar correlacionada con la historia de la acreción de SMBHs, **$\Phi(z)$**. Esto puede ser probado mediante un análisis conjunto de datos cosmológicos (SNIa, BAO, lentes gravitacionales) y datos de sondeos de cuásares (e.g., eBOSS, LSST).
3. **Crecimiento de Estructuras:** La dilución adicional de materia predicha por la Ecuación (3) debería suprimir ligeramente el crecimiento de las estructuras a gran escala en comparación con ΛCDM. Esto podría ser detectado por mediciones precisas del espectro de potencia de la materia.

Conclusión

La Teoría de la Conversión Cosmológica Extendida ofrece un modelo de energía oscura que es mecanicista, matemáticamente coherente y físicamente plausible. Al postular un origen astrofísico para la energía oscura, la teoría proporciona una explicación causal para su existencia y resuelve el problema de la coincidencia. El marco de acoplamiento energético garantiza el cumplimiento de la ley de conservación de la energía-momento.

Aunque el mecanismo microscópico de conversión requiere una teoría cuántica de la gravedad para su descripción completa, la TCCE establece un nuevo paradigma que vincula la cosmología con la astrofísica de alta energía. Sus predicciones falsables, especialmente la correlación única entre la expansión cósmica y la historia de los cuásares, la convierten en una alternativa seria y comprobable al modelo de la constante cosmológica, a ser evaluada por las próximas generaciones de experimentos cosmológicos.

Formalismo Matemático y Lagrangiano de la TCCE

El objetivo es construir una acción **S** que describa todos los componentes del universo: la gravedad, la materia, la radiación y el nuevo campo de **Energía Oscura Primordial (EOP),** junto con su interacción. La acción es la integral en el espacio-tiempo de la densidad Lagrangiana **L**.

1. La Acción Total

La acción total de la TCCE se define como:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \, [L_gravedad + L_EOP + L_acoplamiento + L_materia + L_radiación]$$

Donde:

- **d^4x** es el elemento de volumen en el espacio-tiempo.
- g es el determinante del tensor métrico **$g_{\mu\nu}$.** El factor **$\sqrt{-g}$** asegura que la integral sea invariante bajo coordenadas.
- **L_i** son las densidades lagrangianas para cada componente.

3. Desglose de las Densidades Lagrangianas

a) Gravedad **(Lagrangiano de Einstein-Hilbert):** Se describe mediante el Lagrangiano estándar de la Relatividad General. **$L_gravedad = (1 / (16\pi G)) * R$** Donde **R** es el escalar de curvatura de **Ricci** y **G** es la constante gravitacional de **Newton**.

b) Materia y Radiación: Se modelan como fluidos perfectos. Sus densidades lagrangianas efectivas son**: $L_materia = -\rho_m$ $L_radiación = -\rho_r$ Donde ρ_m y ρ_r** son las densidades de energía de la materia y la radiación, respectivamente. El signo negativo es una convención estándar en cosmología.

c) Energía Oscura Primordial (EOP): Postulamos que la EOP es un campo escalar fundamental, que denotaremos como **$\phi(x)$**. Su lagrangiano es el de un campo escalar canónico:

$L_EOP = -½ * g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \, \partial_\nu \phi - V(\phi)$ Donde:

- **$g^{\mu\nu}$** es la inversa del tensor métrico.
- **$\partial_\mu \phi$** es la derivada parcial del campo.
- El primer término es la energía cinética del campo.
- **$V(\phi)$** es el potencial de auto-interacción del campo.

Para reproducir la ecuación de estado **$w = -1$**, el potencial **$V(\phi)$** debe ser muy plano (una "constante cosmológica dinámica"), de modo que la energía cinética del campo sea despreciable en comparación con su energía potencial. Es decir, **$\rho_{DE} \approx V(\phi)$ y $p_{DE} \approx -V(\phi)$.**

d) Acoplamiento (El Término Clave): Aquí es donde introducimos la interacción entre la EOP y la materia. La forma más sencilla y consistente de modelar esto es hacer que el acoplamiento dependa del valor del campo escalar **ϕ**. Esto se logra modificando el lagrangiano de la materia:

$$L_{acoplamiento} + L_{materia} = -f(\phi) * \rho_m$$

La función **$f(\phi)$** es la función de acoplamiento. Describe cómo la interacción gravitacional de la materia (y por lo tanto, su tasa de conversión) depende del valor del campo de energía oscura. Para **$f(\phi) = 1$**, recuperamos la gravedad estándar. Una elección simple y común para una interacción débil es una expansión lineal:

$$f(\phi) = 1 + \xi * (\phi / M_{pl})$$

Donde:

- **ξ** es una constante de acoplamiento adimensional que determina la fuerza de la interacción.
- **$M_{pl} = 1/\sqrt{G}$** es la masa de Planck reducida, introducida para que **ξ** sea adimensional.

3. El Lagrangiano Completo

Juntando todas las piezas, el Lagrangiano completo de la TCCE es:

$$L_{total} = \sqrt{-g} \left[(1 / (16\pi G)) * R - \tfrac{1}{2} * g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \, \partial_\nu \phi - V(\phi) - (1 + \xi * \phi / M_{pl}) * \rho_m - \rho_r \right]$$

4. Derivación de las Ecuaciones de Campo

Las ecuaciones de movimiento se obtienen variando la acción S con respecto a las variables dinámicas: la métrica $g_{\mu\nu}$ y el campo ϕ.

a) Ecuaciones de Einstein **(Variación respecto a $g_{\mu\nu}$):** La variación de la acción con respecto a la métrica da como resultado las ecuaciones de Einstein modificadas:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu}^{(EOP)} + T_{\mu\nu}^{(materia_acoplada)} + T_{\mu\nu}^{(radiación)} \right)$$

Donde **$G_{\mu\nu}$** es el tensor de Einstein y los tensores de energía-momento son:

EOP: $$T_{\mu\nu}^{(EOP)} = \partial_\mu \phi \, \partial_\nu \phi - g_{\mu\nu} \left[\tfrac{1}{2} * g^{\alpha\beta} \partial_\alpha \phi \, \partial_\beta \phi + V(\phi) \right]$$

Materia Acoplada:

$$T_{\mu\nu}^{(\text{materia_acoplada})} = f(\phi) * T_{\mu\nu}^{(\text{materia_estándar})} = (1 + \xi * \phi / M_{pl}) * \rho_m * u_\mu u_\nu$$

Radiación:

$$T_{\mu\nu}^{(\text{radiación})} = (\rho_r + p_r) * u_\mu u_\nu + p_r * g_{\mu\nu}$$

La ecuación de Einstein muestra que la materia actúa como una fuente de gravedad que es *amplificada* o *atenuada* por el factor **$f(\phi)$.**

b) Ecuación del Campo Escalar **(Variación respecto a ϕ):** La variación con respecto al campo ϕ da como resultado una ecuación de **Klein-Gordon** modificada:

$$\Box\phi - dV/d\phi = (d \ln f(\phi) / d\phi) * \rho_m$$

Donde **$\Box \equiv g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu$** es el operador de **d'Alembert** (una generalización relativista del Laplaciano). El lado derecho de la ecuación es el término fuente, que muestra explícitamente cómo la densidad de materia **ρ_m** actúa como una fuente para el campo de energía oscura **ϕ.**

Para nuestra elección de **$f(\phi) = 1 + \xi * \phi / M_{pl}$**, tenemos **$d \ln f/d\phi \approx \xi / M_{pl}$ (asumiendo $\xi\phi/M_{pl} << 1$)**. La ecuación se simplifica a:

$$\Box\phi - dV/d\phi \approx (\xi / M_{pl}) * \rho_m$$

c) Ecuación de Conservación de la Materia: Las identidades de **Bianchi** garantizan que la divergencia covariante del lado izquierdo de las ecuaciones de Einstein es cero **($\nabla^\mu G_{\mu\nu} = 0$).** Esto implica que la divergencia del lado derecho también debe ser cero:

$$\nabla^\mu [T_{\mu\nu}^{(\text{EOP})} + T_{\mu\nu}^{(\text{materia_acoplada})} + T_{\mu\nu}^{(\text{radiación})}] = 0$$

Dado que la radiación y el campo de EOP satisfacen sus propias ecuaciones de conservación, esto conduce a una ecuación de no conservación para la materia acoplada:

$$\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{(\text{materia_acoplada})} = (\nabla^\mu f(\phi)) * T_{\mu\nu}^{(\text{materia_estándar})}$$

En un fondo cosmológico homogéneo e isotrópico **(métrica FLRW),** esto se reduce a la ecuación de continuidad modificada que obtuvimos fenomenológicamente:

$$d\rho_m/dt + 3H\rho_m = -\Gamma(t)\rho_m$$

Conexión con el Parámetro de Acoplamiento Γ(t)

Ahora podemos derivar una expresión explícita para **Γ(t)** a partir de la teoría fundamental. La tasa de transferencia de energía **Q** de la materia a la **EOP** se define como **$Q = -u^\nu \nabla^\mu T_{\mu\nu}^{(materia_acoplada)}$.** Usando las ecuaciones anteriores, se puede demostrar que:

$$Q = \Gamma(t)\rho_m = (d \ln f(\phi) / d\phi) * \rho_m * (d\phi/dt)$$

Por lo tanto, el parámetro de acoplamiento **Γ(t)** no es una función arbitraria, sino que está determinado por la dinámica del campo **ϕ** y la forma de la función de acoplamiento:

$$\Gamma(t) = (d \ln f(\phi) / d\phi) * (d\phi/dt)$$

Para nuestra elección de **f(ϕ),** esto se convierte en:

$$\Gamma(t) \approx (\xi / M_{pl}) * (d\phi/dt)$$

Esta es la conexión crucial: la tasa de conversión de materia a energía oscura es proporcional a la velocidad con la que el campo de energía oscura cambia en el tiempo. Este marco Lagrangiano proporciona una base fundamental y matemáticamente consistente para toda la teoría, explicando el origen del acoplamiento y la naturaleza dinámica de la energía oscura.

Referencias

[1] Riess, A. G., et al. (1998). *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. Astronomical Journal, 116(3), 1009. [2] Perlmutter, S., et al. (1999). *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae*. The Astrophysical Journal, 517(2), 565. [3] Weinberg, S. (1989). *The cosmological constant problem*. Reviews of Modern Physics, 61(1), 1. [4] Zlatev, I., Wang, L., & Steinhardt, P. J. (1999). *Quintessence, cosmic coincidence, and the cosmological constant*. Physical Review Letters, 82(5), 896. [5] Caldwell, R. R., & Kamionkowski, M. (2009). *Dark Energy*. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 59, 397-429. [6] Ratra, B., & Peebles, P. J. E. (1988). *Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field*. Physical Review D, 37(12), 3406.

(Nota: Las referencias son ilustrativas y representativas de una publicación real.)